

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

粘弾性要素に支持された
ヘリングボーン動圧気体軸受の安定性
に関する研究

Study on Stability Characteristics of
Herringbone-Grooved Aerodynamic Journal Bearings
with Viscoelastic Supports

申 請 者

宮 永	宜 典
Norifumi	MIYANAGA

機械工学専攻 トライボロジー研究

2011 年 12 月

ターボ機械や情報機器などの様々な回転機械は、小型・高性能化に向けた取り組みが精力的に行われている。また、近年では、機械加工技術のみならず MEMS 技術を利用し、ガスタービンエンジンの超小型化（フィンガートップサイズ、パームトップサイズなど）を目指した研究が注目を集めている。これらのウルトラマイクロガスタービンエンジンは、自律系ロボットやポータブル PC 等の分散型電源として実現が期待されている。また一方で、耐環境性や省エネルギー性の面から、新たな燃料を用いるウルトラマイクロガスタービンエンジンのような形式だけでなく、航空機や自動車などの輸送機において未利用で排気されている圧縮空気を動力源として用いるシステムも考案されている。超小型化により移動性や省スペース性を高めることで、必要な場所や時に応じて必要なだけ装置を配置、駆動し、発電量を調節することも可能となる。

しかし、このような小型回転機械においてこれまで以上の高い性能を確保するためには、回転軸を超高速で回転させ、かつ安定に支持できる軸受技術が不可欠である。そのため、摩擦特性に優れる気体軸受技術を利用することが望まれているが、気体軸受は軸受剛性や減衰性の面で劣り、高速回転時に発生する自励振動をいかに抑制するかが実現のカギである。このような背景のもと、現在、小型・高速化や高精度運転ならびに生産性に優れたヘリングボーン動圧気体軸受が注目されている。しかし、この軸受単体では現在要求される高い安定性を実現することは困難である。この解決策の 1 つは、ヘリングボーン動圧気体軸受と軸受を粘弾性支持する安定化法を組み合わせ、動圧気体軸受システムを構成することであると考えられる。軸受外部に O リングなどの粘弾性要素を配置することで、軸受系の励振エネルギーをある程度まで吸収し、自励振動の発生回転数を高速回転側へシフトさせることが期待できる。しかし、粘弾性要素を付加することで軸受の支持剛性そのものは低下し、支持条件によっては安定化効果が得られない場合やかえって不安定化する場合もあり得ると考えられる。そのため、このような軸受系の安定性を理論的かつ実験的に検討することが不可欠となっている。しかし、粘弾性要素に支持されたヘリングボーン動圧気体軸受の安定性はこれまでに検討された例がなく、より高い安定性を実現できうる軸受支持条件は明らかでない。

このような背景のもと、本研究は以下のことを目的としている。

- 1) 軸受を支持している時の O リング（以下、軸受支持 O リングと呼ぶ）の物性値を明らかにし、それらの取扱いを確立する。
- 2) 軸受支持 O リングの粘弾性特性を考慮したヘリングボーン動圧気体軸受系の安定解析を行い、より高い安定性を実現するための軸受支持条件を検討する。
- 3) 小型軸受試験装置を用いて、軸受系の安定限界特性を実験的に明らかにするとともに、これらを解析結果と比較しながら検討する。

本論文は以下の 5 章により構成されている。

第1章	緒言
第2章	軸受支持 O リングの粘弾性特性
第3章	軸受系の安定解析
第4章	軸受系の回転実験
第5章	結言

第1章では、本研究の背景から始まり、気体軸受の特徴とその問題点を整理するとともに従来の研究をまとめることにより、本研究の重要性と得られる結果の意義を明確にしている。また、本研究の範囲で明らかにする点を目的とともに明らかにしている。

第2章では、軸受支持 O リングの粘弾性特性について明らかにしている。O リングのような粘弾性体で支持された軸受系の安定性は、軸受支持部の粘弾性特性に強く影響を受ける。そのため、このような要素を伴う軸受系の安定性を検討するためには、軸受を支持している状態での O リングの粘弾性特性を明らかにしておく必要がある。

そこで本章では、軸受支持 O リングの粘弾性体としての取扱いを明らかにした後、これに基づいてホワール振動を想定した 0.5~8.0kHz の周波数範囲の微小振動下において弾性係数と減衰係数を実験的に求めている。また、軸受系の設計において重要であると考えられる、O リングの材質、つぶし率および温度などの影響について検討している。次に、弾性係数と減衰係数の非線形的な取扱いを確立するために、近似精度が高くかつ物理的意味が明確な実験式を提示している。その後、これらの式が O リングの材質、つぶし率および温度が変化した際にも有効であることを示し、このような非線形要因の影響を式中の物性値を手掛かりとして考察している。

本章によって、軸受支持 O リングの弾性係数および減衰係数を数値的に取り扱うことが可能となり、このことは軸受系の安定解析に有用であるといえる。また、O リングの材質、つぶし率および温度などの影響を実験式中の物性値の組み合わせとして表現することが可能となり、これらの値を手掛かりとして、より高い安定性を実現するための軸受支持条件を検討することが可能になったといえる。

第3章では、第2章で示した実験式を用いて、O リングの粘弾性特性を考慮してヘリングボーン動圧気体軸受の安定限界特性について理論的に検討している。すなわち、実験式中の物性値をパラメータとして変化させることにより、様々な軸受支持条件を模擬し、ヘリングボーン動圧気体軸受の安定性に及ぼす影響を明らかにしている。

本章ではまず、軸受系の解析モデルを明らかにした後、無限溝数モデルに基づいてヘリングボーン動圧気体軸受に対する圧縮性潤滑方程式を誘導している。次に、潤滑方程式をジャーナルの旋回微小振動を仮定して線形化し、軸受系の特性方程式と連立しながら解くことで、安定限界線図を求める安定解析方法、ならび

に潤滑方程式を軸受系の運動方程式と連立しながら時間ステップごとに直接解き、軸と軸受の軸心を追跡する安定解析方法の両方法について示し、両解析結果を比較することで解析結果の妥当性を検証している。また、自励振動モードとして、シリンドリカルモードとコニカルモードの両方に着目し、双方の安定限界線図を比較検討することで、本研究で重要となる自励振動モードについて明らかにしている。さらに、実験式中の物性値をパラメータとして変化させ、軸受が弾性要素のみで支持されている場合、軸受が線形粘弾性要素に支持されている場合、軸受が非線形粘弾性支持されている場合を模擬し、それぞれの場合について、物性値が軸受系の安定性に及ぼす影響を検討している。また、非線形粘弾性支持の場合において、軸受系の安定限界値が最大となった物性値の組み合わせを、第2章において得られた実際のOリングの値と比較検討している。

第4章では、エアタービン駆動の小型軸受試験装置を用いて、軸受系の安定限界特性を実験的に明らかにするとともに、実験結果を解析結果と比較検討している。

本章ではまず、軸受試験装置の概要を述べるとともに、実験方法および安定判別方法について示している。次に、この試験装置を用いて、剛的に支持されたヘリングボーン動圧気体軸受の安定限界特性を解析結果と比較しながら明らかにしている。さらに、この結果を基準として、ヘリングボーン動圧気体軸受をOリングによって支持した場合の安定化効果について論じている。また同時に、軸受をOリングによって支持することで、安定運転時、すなわち自励振動が生じていない時の振動振幅が剛体支持軸受の約半分に低減できうることを示している。その後、Oリングの材質やつぶし率、さらに軸受系の温度などを変化させた場合について実験を行い、それらの影響を解析結果と比較しながら考察している。最後に、本研究により得られた成果に基づいて、軸系6mmの軸受系において、 53min^{-1} を超える超高速回転を安定に支持できる動圧気体軸受システムを実証し、その際の実験結果の詳細について示している。また、このときのOリングの材質やつぶし率、さらに、軸受系の温度変化およびそれに伴う軸受半径すきまの変化などを考慮した安定解析を行い、実験結果と比較検討している。

第5章では、本研究を総括するとともに結論を述べ、今後の課題について言及している。本研究では、すなわち、ヘリングボーン動圧気体軸受の粘弾性支持要素として、安価かつ簡便なOリングを用い、その軸受支持条件下における取扱いを明らかにした。また、この結果に基づいて軸受系の安定解析を行い、実験結果と良い一致を得られたとともに、粘弾性支持されたヘリングボーン動圧気体軸受の安定性について、理論と実験の両側面から明らかにすることができたといえる。今後は、本研究で得られた成果を実現するためのより詳細な軸受支持要素の物性評価、およびより複合的な周波数および振動モードに対する検討が必要であると考えられる。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏 名 宮永 宜典 印

(2011年 12月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論 文○	宮永宜典, 富岡淳, 軸受支持 O リングの温度特性を考慮したヘリングボーン動圧気体軸受の安定性, 設計工学, 46, 9(2011), 530-535.
論 文○	宮永宜典, 富岡淳, 外部弾性・減衰要素の周波数依存性を考慮したヘリングボーン動圧気体軸受の安定性, 設計工学, 46, 4(2011), 231-238.
論 文	富岡淳, 宮永宜典, 牛尾裕一, 三上誠, 非線形軌道法を用いたジャーナル軸受内の安定領域の検討, 設計工学, 45, 11(2010), 563-568.
論 文○	富岡淳, 宮永宜典, 外部弾性・減衰要素に支持されたヘリングボーン動圧気体軸受の運転安定限界特性, 日本機械学会論文集 C 編, 76, 767(2010), 1812-1818.
論 文	富岡淳, 宮永宜典, 血液シール下における定常流型人工心臓用メカニカルシールの表面粗さの影響, 日本機械学会論文集 C 編, 76, 769(2010), 2332-2339.
論 文	Jun Tomioka, Norifumi Miyanaga, Effect of surface roughness of mechanical seals under blood sealing, Lubrication Science, 22, 10(2010), 443-452.
論 文○	Jun Tomioka, Norifumi Miyanaga, Effect of the Surface Roughness of Sealing Face in the Mechanical Seal for Rotary Blood Pumps on the Characteristics of the Shaft Seal, Journal of Japan Society for Design Engineering, 45, 2(2010), 100-106.
論 文	Jun Tomioka, Norifumi Miyanaga, Measurement of Dynamic Properties of O-rings and Stability Threshold of Flexibly Supported Herringbone Grooved Aerodynamic Journal Bearings, Tribology Online, 3, 7(2008), 366-369.
論 文	富岡淳, 宮永宜典, 定常流型人工心臓用メカニカルシールにおけるしゅう動面の表面粗さが軸シール特性に及ぼす影響, 設計工学, 42, 10(2007), 581-588, 2007.
論 文○	富岡淳, 宮永宜典, 大田英輔, 高橋毅, 荻本健治, 森敏夫, 加賀見文彦, 超高速回転体を支持するヘリングボーン動圧気体軸受の開発, 日本機械学会論文集 C 編, 73, 730(2007), 1840-1846.
国際会議	Norifumi Miyanaga, Jun Tomioka, Stability Threshold of Herringbone-Grooved Aerodynamic Journal Bearings with Considering Deformation ratio of Support O-rings, International Tribology Conference, (2011), P09-06.
国際会議	Norifumi Miyanaga, Jun Tomioka, Whirl Characteristics of Herringbone Grooved Aerodynamic Journal Bearings with Considering Frequency Dependence of External Support Elements, World Tribology Congress, (2009), 714.
国際会議	Jun Tomioka, Norifumi Miyanaga, Effect of Surface Roughness of Mechanical Seal under Blood Sealing, World Tribology Congress, (2009), 503.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
国際会議	Jun Tomioka, <u>Norifumi Miyanaga</u> , Eisuke Ota, Takeharu Ogimoto, Shinji Matsuei, Toshio Mori, Fumihiko Kagami, Study of the Herringbone Grooved Aerodynamic Journal Bearings for the Support of an Ultra-High-Speed Rotor, Proceedings of 3 rd ASIATRIB, (2006), 215-216.
国際会議	Jun Tomioka, <u>Norifumi Miyanaga</u> , Effect of the Surface Roughness of the Mechanical Seal for Rotary Blood Pump, Proceedings of 3 rd ASIATRIB, (2006), 451-452.
国際会議	Jun Tomioka, <u>Norifumi Miyanaga</u> , Takeharu Ogimoto, Takeshi Takahashi, Fumihiko Kagami, Toshio Mori, Development of an Ultra-High-Speed Rotor Supported by Herringbone Grooved Aerodynamic Journal Bearings, Proceedings of 7th ISAIF, (2005), 141-146.
国際セッション講演	Jun Tomioka, <u>Norifumi Miyanaga</u> , Measurement of Dynamic Properties of O-rings and Stability Threshold of Flexibly Supported Herringbone Grooved Aerodynamic Journal Bearings, Proceedings of JAST International Symposium, (2008), 507-508.
講演	<u>宮永宜典</u> , 富岡淳, 粘弾性支持されたヘリングボーン動圧気体軸受のコニカルホワール特性, 日本設計工学会北陸支部平成 23 年度研究発表講演会講演論文集, (2011), 17-21.
講演	<u>宮永宜典</u> , 富岡淳, 超高速回転体を支持するヘリングボーン動圧気体軸受の温度計測, 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会講演論文集, (2011), 1106.
講演	富岡淳, 林洋次, <u>宮永宜典</u> , 粘弾性流体潤滑ジャーナル軸受の安定解析, 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会講演論文集, (2011), 1109.
講演	<u>宮永宜典</u> , 富岡淳, 軸受支持要素の非線形性がヘリングボーン動圧気体軸受の安定性に及ぼす影響, 日本機械学会東海支部 60 期総会・講演会, (2011), 604.
講演	富岡淳, 林洋次, <u>宮永宜典</u> , 粘弾性流体で潤滑されたジャーナル軸受の安定運転限界特性 (第 2 報, 非線形軌道法による解析), 日本機械学会東海支部 60 期総会・講演会講演論文集, (2011), 603.
講演	<u>宮永宜典</u> , 富岡淳, 軸受支持 O リングのつぶし率がヘリングボーン動圧気体軸受の安定性に及ぼす影響, 日本機械学会北陸信越支部 48 期総会・講演会講演論文集, (2011), 441-442.
講演	富岡淳, 林洋次, <u>宮永宜典</u> , 粘弾性流体で潤滑されたジャーナル軸受の安定運転限界特性 (第 1 報, 摂動法による解析), 日本機械学会北陸信越支部 48 期総会・講演会講演論文集, (2011), 439-440.
講演	<u>宮永宜典</u> , 富岡淳, 軸受支持 O リングの温度依存性がヘリングボーン動圧気体軸受の安定性に及ぼす影響, 日本設計工学会東北支部平成 22 年度研究発表講演会講演論文集, (2011), 25-28.
講演	<u>宮永宜典</u> , 富岡淳, 外部弾性・減衰要素の支持されたヘリングボーン動圧気体軸受のコニカル安定性, 日本設計工学会 2010 年度春季研究発表講演会論文集, (2010), 83-84.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講 演	富岡淳, <u>宮永宜典</u> , 相馬周平. 血液シール下におけるメカニカルシールしゅう動面の温度計測, 日本設計工学会 2010 年度春季研究発表講演会論文集, (2010), 69-70.
講 演	富岡淳, <u>宮永宜典</u> , 横山真平, 軸受支持要素の温度特性を考慮したヘリングボーン動圧気体軸受の安定性 (第 1 報, 実験的検討), 日本設計工学会 2010 年度春季研究発表講演会論文集, (2010), 77-78.
講 演	<u>宮永宜典</u> , 富岡淳, 軸受支持要素の温度特性を考慮したヘリングボーン動圧気体軸受の安定性 (第 2 報, 実験的検討), 日本設計工学会 2010 年度春季研究発表講演会論文集, (2010), 79-80.
講 演	富岡淳, <u>宮永宜典</u> , 牛尾裕一, 三上誠, 非線形軌道法を用いたジャーナル軸受内の安定領域の検討, 日本設計工学会 2010 年度春季研究発表講演会論文集, (2010), 85-86.
講 演	富岡淳, <u>宮永宜典</u> , ヘリングボーン動圧気体ジャーナル軸受におけるコニカルモードの安定限界特性 (第 2 報, 非線形起動法による検討), 日本機械学会東北支部第 45 期秋季講演会講演論文集, (2009), 123-124.
講 演	富岡淳, <u>宮永宜典</u> , ヘリングボーン動圧気体ジャーナル軸受におけるコニカルモードの安定限界特性 (第 1 報, 摂動法による検討), 日本機械学会茨城講演会講演論文集, (2009), 213-214.
講 演	<u>宮永宜典</u> , 富岡淳, 外部弾性・減衰要素の非線形性がヘリングボーン動圧気体軸受の安定性に及ぼす影響, 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集(4), (2009), 155-156.
講 演	<u>宮永宜典</u> , 富岡淳, 軸受支持 O リングの非線形性がヘリングボーン動圧気体軸受の安定性に及ぼす影響 (第 2 報, 減衰係数の影響), 日本設計工学会北陸支部平成 21 年度研究発表講演会講演論文集, (2009), 19-20.
講 演	<u>宮永宜典</u> , 富岡淳, 軸受支持 O リングの非線形性がヘリングボーン動圧気体軸受の安定性に及ぼす影響 (第 1 報, 弾性係数の影響), 日本設計工学会中国支部講演論文集, (2009), 19-20.
講 演	富岡淳, <u>宮永宜典</u> , 気体潤滑ヘリングボーンスラスト軸受の安定特性, 日本設計工学会 2009 年度春季研究発表講演会, (2009), 13-14.
講 演	富岡淳, <u>宮永宜典</u> , 血液シール下におけるメカニカルシールの表面粗さの影響, 日本トライボロジー会議予稿集 (東京 2009-5), (2009), 149-150.
講 演	<u>宮永宜典</u> , 富岡淳, 外部弾性・減衰要素の周波数依存性を考慮したヘリングボーン動圧気体軸受のホワール特性, 日本トライボロジー会議予稿集 (東京 2009-5), (2009), 113-114.
講 演	富岡淳, <u>宮永宜典</u> , 軸受支持 O リングの周波数依存性を考慮した高速回転用ヘリングボーン動圧気体軸受の動特性, 日本機械学会山梨講演会講演論文集, (2008), 31-32. その他, 講演 9 件